

## ペニオトロンの高性能化に関する研究

著者	佐藤 信之
号	1855
発行年	1998
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10662">http://hdl.handle.net/10097/10662</a>

氏 名	佐 藤 信 之
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成11年2月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和59年3月 福井大学大学院工学研究科修士課程応用物理学専攻 修了
学 位 論 文 題 目	ペニオトロンの高性能化に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 横尾 邦義 東北大学教授 山之内 和彦 東北大学教授 水野 皓司

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、ミリ波からサブミリ波帯において高効率な電磁波源として期待されるペニオロンについて、その高性能化を目的として行った一連の研究の成果について述べたものである。

### 第1章 序論

序論は本研究の背景、目的及び効果について述べている。

まず、第2章および第3章においては、ペニオロンのための設計システムの必要性和、開発した設計システムの特長および有効性について述べている。第4章から第6章では、上記設計システムを用いて行った、ペニオロンの高性能化を目指した研究の成果について述べている。第7章は本論文のまとめである。第2章から第6章の内容は以下の通りである。

### 第2章 ペニオロンの構成

本章においては、ペニオロンの最適設計に必要な条件について述べている。

まず、ペニオロンは、直流磁場中で回転する電子ビームと電磁波との相互作用を基本原理とすることから、ペニオロン特有の以下の3つの構成要素が必要であることを明らかにした。すなわち、第1に電子ビーム源として、中空円筒状電子ビームを生成するための電子銃、第2にその電子ビームを回転させるために必要なカスプ磁場を形成するための磁場系および電子と高周波電磁場との相互作用空間に印加する一様磁場形成のための磁場系、第3に電子と高周波電磁場の相互作用のための、任意形状断面を有する導波管形空洞共振器または伝送線路である。ペニオロンの高性能化のためには上記各構成要素を最適設計する必要がある、これらの構成要素に要求される形状および性能と、最適設計のための解析システムに必要とされる条件を明らかにした。

### 第3章 ペニオロンのCAD

本章においては、ペニオロンの最適設計のために開発したコンピュータ設計システムについて述べている。

第1に、電子銃の設計に必要な静電場計算プログラムにおいては、電子軌道の追跡プログラムとの密接な連携により、電子軌道に沿った電荷密度分布を静電場解析に取り込むことによって、電子ビームによる空間電荷効果の評価を可能とし、加えて、収束操作のための繰り返し計算に対して安定化を図ることによって、温度制

限領域から空間電荷制限近傍の領域までの範囲でカソードの放射電流密度の算定を実現した。第2に、磁場系の設計について、ペニオトロン特有の急峻なカスプ磁場を有する磁場系を設計するためのプログラムを開発し、ペニオトロンの設計に必要な2次元円筒対称の磁場系の中心軸近傍の磁場分布について十分な計算精度が得られることを明らかにした。第3に、導波管形空洞共振器および伝送線路の設計システムを開発し、これによってペニオトロンの相互作用系に必要なマグネトロン形空洞共振器等の各種断面形状の共振器のモード解析が可能となることを示した。また、共振器断面形状の対称性を利用した解析手法を考案し、電子と電磁波との相互作用の解析時間の大幅な短縮を可能とした。

次に、開発した設計システムを用いて実際にペニオトロンの各構成要素を設計し、その有効性を検証した。

まず、ペニオトロン特有の回転電子ビームのための電子銃の設計を行い、空間電荷効果を考慮した上でカソードから放射電流量の算定とビーム形状の最適化を行い、これに基づいて電子銃を試作した結果、設計値の30kVの加速電圧において、ビーム電流約1Aの中空電子ビームの生成を実現した。

次に、回転電子ビームを形成するためのカスプ磁場の最適設計を行い、円盤状ポールピースを用いてカスプ磁場を整形することによって、電子を分散させることなく回転電子ビームが形成可能な磁場分布が実現できることを示した。この結果を用いて磁場系を製作し、設計通りの磁場分布が形成されているのを確認した。さらに、上記電子銃と磁場系を組み合わせ、実際にはほぼ設計通りの回転電子ビームが形成されることを確認した。

最後に、相互作用系のためのマグネトロン形空洞共振器の解析を行い、共振器中に励振される各モードの電場分布を明らかにした。また、断面形状の対称性を利用した解析領域の分割の必要性和、その効果についての検討を行い、縮退モード等の不要モードの除去が可能で、かつ計算時間の削減と精度の向上が得られることを明らかにした。

#### 第4章 高調波ペニオトロン

本章においては、高周波数化を目的としたサイクロトロン高次高調波ペニオトロンの設計について述べている。

サイクロトロン周波数の高次高調波を利用したペニオトロン動作において、電子と電磁波の結合を強めるためのマグネトロン形空洞共振器を用い、共振器構造の単純化と高Q化が可能な空間高調波を利用した3次高調波動作および10次高調波動作の設計を行った。これに基づいて行われた実験管の製作および動作実験の結果、3次高調波において、発振周波数30GHz、変換効率75%、さらに、使用済み電子ビームからのエネルギー回収を併用することで、実効的な変換効率92%が達成されている。また、10次高調波動作においても、発振周波数100GHz、変換効率6%の動作が実現されている。

#### 第5章 自己共鳴ペニオトロン

本章においては、高効率化を目指した自己共鳴ペニオトロンについて述べている。

ペニオトロンに対して、自己共鳴条件を適用することによって、電子の運動エネルギーをすべて電磁波のエネルギーに変換可能であることを指摘し、その効果を解析するため、電子と進行波の相互作用が解析可能なシミュレーションプログラムを開発した。これを用いて動作解析を行った結果、位相速度が自由空間中の光速と等しい場合、ペニオトロンの変換効率が99.5%に達することを明らかにした。一方、通常の導波管中の伝搬波との相互作用においては、著しい効率の低下が生ずるが、この効率の低下について原因の検討を行い、自己共鳴条件を補正するために直流磁場にテーパーをつける方法を考案した。そして、動作解析を行った結果、自

己共鳴条件に磁場テーパーを併用することにより、通常の導波管形の相互作用系においても、変換効率88.6%が達成可能であることを示した。

上記の解析結果に対して、マグネトロン形空洞共振器を用いた実験管の動作実験の結果より、変換効率75%の動作が達成され、電子ビームのエネルギー分布の測定から、自己共鳴の機構が有効に機能していることが確認されている。

この結果をもとに、自己共鳴条件を厳密に満足する相互作用系として4重極形伝送線路を考案し、その高周波電磁場分布を解析するためのプログラムを開発した。解析の結果、ペニオトロン動作に必要な電磁場分布が形成可能であることを明らかにした。4重極形伝送線路を用いた動作に関しては、広帯域にわたる後進波動作が確認され、4重極伝送線路がペニオトロンの相互作用系として有効に機能しており、連続周波数可変の電磁波源に対しても適用可能であることが示されている。

## 第6章 永久磁石を用いたペニオトロン

本章においては、ペニオトロンの実用化を目指した、永久磁石を用いた磁場系の開発について述べている。

ペニオトロンには直流磁場を印加するための磁場系は不可欠であり、この磁場系を永久磁石を用いて構成することによって、大幅な小型化、小電力化および高信頼化が可能であることを指摘した。これを検証するために、永久磁石を用いたペニオトロン用磁場系のための設計システムを構築した。

作製した設計システムを用いて、まず、軸方向磁化型永久磁石を用いた磁場系の解析を行った。その結果、軸方向磁化磁石には端面に磁場分布の反転領域が存在し、この磁石端面の分布を用いることにより、電子銃部のカスプ磁場と相互作用部の磁場を一体化した磁場系が構成可能であることを示した。解析に基づき磁場系の最適設計を行った結果、ペニオトロン用の磁場系として十分利用可能な磁場分布が形成可能であることを明らかにした。この結果に従って、磁場系の試作を行った結果、設計通りの磁場分布が形成されていることを確認した。この磁場系はペニオトロンの動作実験に使用され、永久磁石による磁場系を用いたペニオトロンが実現可能で、大幅な小型軽量化、省電力化が可能となることが実証された。

次に、径方向磁化型永久磁石による磁場系の解析を行った。その結果、径方向磁化型永久磁石を用いた場合、電子銃部と相互作用部の磁場を独立に形成でき、複数の磁石を組み合わせることによって、従来のペニオトロンの磁場系を、ほぼそのまま永久磁石を用いた磁場系に置き換え可能であることを明らかにした。これによって、永久磁石を用いた磁場系を用いたペニオトロンにおいても、相互作用部の磁場強度を上げることが可能となり、サイクロトロン高次高調波動作を用いて動作周波数の高周波数化が可能なことを明らかにした。

以上のように、本論文は、高周波数帯での電磁波源として有望なペニオトロンの高周波数化、高効率化および実用化を目指して行った、ペニオトロンの最適設計のためのシミュレーションシステムの開発と、それを用いて得られた一連の研究成果を纏めたものである。

## 審査結果の要旨

マイクロ波、ミリ波帯の電磁波の利用は、従来の通信手段に止まらず核融合プラズマの加熱や計測、工業用加熱源などその用途は多様化している。このため、上記周波数帯域の電磁波源の高出力化と高効率化が要請されている。著者は、サイクロトロン高速波管の一種で、高出力、高効率の電磁波源として期待されるペニオトロンに関し、高精度の設計法といくつかの動作方式を開発し、ペニオトロンの高性能化と実用化に道を開いた。本論文はその成果を取りまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、ペニオトロンの各構成要素についてペニオトロンの高性能化に向けた開発課題を明らかにしている。

第3章では、設計に使用する有限要素法に運動電子に対する連続要素と電磁界モードに沿った要素の構築という概念を導入した設計システムを開発し、ペニオロン設計の高精度化と高速化を可能とした。これは、マイクロ波電子管を設計する上での共通の重要な技術であり評価できる。

第4章では、前章で開発した設計システムを用いてサイクロトロン高調波ペニオトロンを設計し、試作された30GHz帯のサイクロトロン3次高調波実験管でほぼ設計値通りの動作効率92%が実証された。これは、ペニオトロンの実用化のための重要な成果である。

第5章では、理想的なペニオロン動作と考えられる自己共鳴ペニオトロンの相互作用系として4重極回路を考案し、シミュレーションの結果電子ビームから電磁波エネルギーへの変換効率がほぼ100%に達することを示している。

第6章では、永久磁石を用いるペニオロンについて、磁石構成方式のいくつかの提案を行い、これらの構成方式によるペニオトロンの設計を行っている。また、その一構成方式によるペニオロン実験管を試作し、サイクロトロン2次高調波動作で変換効率36%を実証している。これは、サイクロトロン高速波管に初めて永久磁石を導入し、高効率の動作を実証したもので、工業用サイクロトロン高速波管の実用化の端緒を開いた重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、ペニオトロンの最適設計のための設計システムを開発し、これをいくつかのペニオロン実験管に適用してペニオトロンの高性能化と実用化に道を開いたもので、電子工学、マイクロ波工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。